

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905400

基于机器视觉的手机尾插件精密测量方法研究*

张喜民¹, 余奇颖², 张金博¹, 付安英¹

(1. 陕西国际商贸学院信息工程学院 西安 712046; 2. 西安电子科技大学计算机学院 西安 710071)

摘要:提出了一种基于机器视觉的小尺寸不规则零件精密测量方法和系统,方法包括图像采集、图像增强、图像配准、边缘检测、目标直线提取、相机标定和计算测量环节。针对传统尺度不变特征变换(SIFT)匹配算法完全忽略特征点之间的几何关系,对于灰度变化较平滑的图像在寻找匹配特征点时易产生较多误匹配的问题,引入轮廓匹配获取图像几何信息、对SIFT特征点匹配进行约束,并通过随机样本一致(RANSAC)算法去除噪声点对的影响、精确估计几何变换矩阵;针对现有Hough变换拟合直线算法对非线性边缘易在Hough空间形成伪峰、影响边缘检测精准确度的问题,设计了Hough空间投票权重分配新策略来抑制伪峰的产生。实验结果表明:与传统方法相比,所提出的方法特征匹配精度提高了12%,直线检测精准确度提高了22%,系统测量精度达到0.015 mm。

关键词: 机器视觉;尺寸测量;图像配准;Hough变换

中图分类号: TH166 TP392 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.61

Research on precision measurement method for mobile phone tail plug part based on machine vision

Zhang Ximin¹, Yu Qiyang², Zhang Jinbo¹, Fu Anying¹

(1. School of Information Engineering, Shaanxi Institute of International Trade & Commerce, Xi'an 712046, China;

2. School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Taking the geometric size of the mobile phone tail plug parts as detection object, a precise measurement method and system of small size, irregular shape parts based on machine vision is proposed. The method includes image acquisition, image enhancement, image registration, edge detection, target line extraction, camera calibration and computational measurement. Aiming at the problems that the traditional scale-invariant feature transform(SIFT) matching algorithm completely ignores the geometric relationship among different feature points and is prone to more mismatches when searching for matching feature points in the workpiece images with smooth gray change, an improved image registration algorithm is proposed, the contour matching is introduced to acquire image geometric information and constrain the SIFT feature point matching, and the random sample consensus(RANSAC) algorithm is used to remove the influence of noise point pair and precisely estimate the parameters of geometric transformation array. Aiming at the facts that the existing Hough transform fitting line algorithm can easily form pseudo-peaks in Hough space for non-linear edges and affect edge detection accuracy, a new strategy of spatial voting weight allocation in Hough space is designed to suppress the pseudo-peak generation. The experiment results show that compared with traditional method, the proposed method improves the accuracy of feature point matching by 12% and the accuracy of line detection by 22%, and the measurement accuracy of the proposed system reaches 0.015 mm.

Keywords: machine vision; dimensional measurement; image registration; Hough transform

0 引言

手机尾插工件尺寸检测是手机自动化生产制造过程中不可或缺的一环,传统的方法是用精密测量工具进行人工抽样检查,存在着测量速度慢、人为因素影响大等缺点,无法满足大规模自动化生产制造的需求。将机器视觉技术引入工件尺寸几何测量中,可实现非接触性高精度测量,既能避免测量过程中的人为误差,又可实现快速和连续测量,能有效保证生产过程的自动化。基于机器视觉的精密测量技术在工业生产现场的应用越来越普遍,已成为国内外研究热点^[1-6]。

国外机器视觉检测技术的普遍研究起始于20世纪80年代^[7]。自1977年麻省理工学院 David Marr 教授提出了著名的 Marr 视觉理论后,机器视觉获得了蓬勃的发展,新概念、新方法、新理论不断涌现,到目前为止,机器视觉仍然是一个非常活跃的研究领域^[3]。国内机器视觉的研究从20世纪90年代开始得到重视。国内外基于机器视觉的零件尺寸测量方面,主要有以下主要研究成果。1986年 Caufield^[8]构建了用于钢条尺寸测量的机器视觉系统,能够在 $3 \times 2 \text{ mm}^2$ 的视区内实现误差小于0.01 mm的测量;Mills等^[9]在1991年利用高分辨率相机实现了对圆柱形工件的尺寸测量,并且详细分析了影响测量精度的因素;2009年 Böhm J 等设计了一套检测高抛光摩擦表面浅划痕的系统^[10],该系统能够有效检测宽 $1 \mu\text{m}$,深40 nm的划痕。2008年代娜^[3]对轴承和端子的尺寸测量进行了研究与分析;2009年刘超等^[11]将机器视觉技术引入微小零件自动测量和精密装配领域,实现了对零件阶梯轴边缘位置的高精度检测,测量精度达到了0.02 mm;2014年刘国阳^[4]设计了一套机器视觉高精度测量系统,用以检测微小零件的尺寸参数,并且以喷嘴为检测对象,测量精度也到了0.02 mm;2018年冯锴^[1]设计了基于机器视觉的金属手机外壳尺寸测量系统,测量精度达到0.03 mm。目前国内外机器视觉检测技术研究主要针对于规则形状物体,对于非规则形状物体的研究较少,2015年朱霞^[12]研制了基于机器视觉的弹簧卡箍在线检测系统,检测的准确率高于97%,但测量误差为0.3 mm,测量精度相对较低。

本文以手机尾插工件尺寸检测为背景,提出了一种基于机器视觉的小尺寸不规则零件的精密测量方法和系统。与传统方法相比,本文进行了如下改进:1)在图像配准环节中,针对传统尺度不变特征变换(scale-invariant feature transform, SIFT)匹配算法完全忽略特征点之间的几何关系、只注重局部优化、对于灰度变化较平滑的图像在寻找匹配特征点对时易产生较多误匹配的问题,引入轮廓匹配获取图像几何信息、对 SIFT 特征点匹配进行约

束,并通过随机样本一致性算法(random sample consensus, RANSAC)去除噪声点对的影响、精确估计几何变换矩阵,提高了特征点匹配精度;2)在直线检测环节,针对现有 Hough 变换拟合直线算法对非线性边缘易在 Hough 空间形成伪峰、影响边缘检测准确度的问题,设计了 Hough 空间投票权重分配新策略来抑制伪峰点产生,提高了图像边缘直线检测精准度。基于高分辨率工业相机和高性能嵌入式工控机研制了精密测量系统,系统精度达到0.015 mm,可满足手机生产自动化检测的要求。

1 检测原理及算法流程

手机尾插工件的实物与二维结构如图1所示,测量系统的目标是检测手机尾插工件的4条棱间的外间距与内间距是否符合标准,即精准提取 a、b、c、d 所对应的内外8条直线在图像中的位置,计算棱 a 与 d、b 与 c 之间的几何垂直距离 D_{ad} 与 D_{bc} ,通过与标准尺寸的比较来判断待检测工件是否合格。

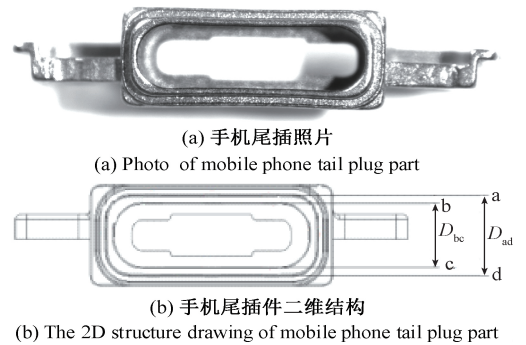


图1 手机尾插件照片及二维结构

Fig.1 Photo and 2D structure drawings of mobile phone tail plug part

本文算法流程如图2所示,主要分为6个部分:图像增强、图像配准、边缘检测、直线拟合、相机标定以及计算测量。

1.1 图像增强

由于受到光照、CCD 特性等因素的影响,数码相机采集的图像存在随机噪声,影响测量精度,因此,需对采集的图像进行增强。中值滤波在去除图像噪声的同时能够保持清晰的图像轮廓,本文也采用此方法去除原始采集图像的噪声,实现图像的增强,具体方法是用每个像素相邻像素的灰度中值来代替该像素的值,算法如式(1)所示,其中: S 为滤波模板,采用 3×3 模板。

$$g(x, y) = \underset{(i, j) \in S}{\text{median}} [f(i, j)] \quad (1)$$

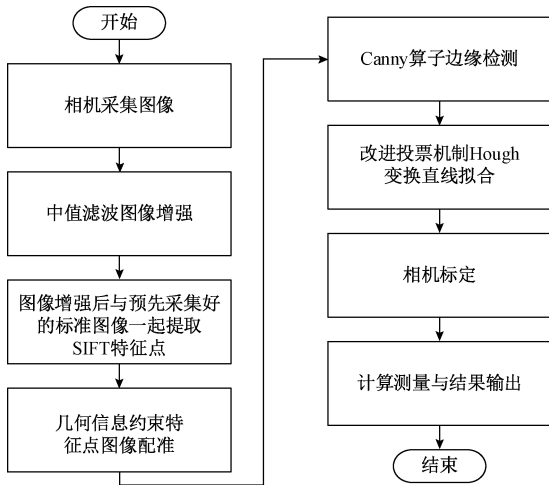


图 2 算法流程

Fig.2 Algorithm flow chart

1.2 图像配准

在采集手机尾插件图像的过程中,受传送装置震动等因素影响,工件往往会发生偏移或旋转,为便于后续测量计算,需将采集的图像变换到统一的角度,并与标准图像进行配准。

目前,图像配准方法大致分为两类:一类是基于灰度的配准方法^[13];另一类是基于特征的配准方法^[14-16]。基于特征的方法将整幅图像的分析转化为对特征空间的分析,能有效降低计算复杂度。本文采用基于特征的方法,通过以下步骤来配准图像:特征提取、特征匹配、变换参数估计和图像变换。特征提取从图像中提取点、线、区域、模板等信息;特征匹配根据特征的相似度确立特征之间的对应关系;变换参数估计根据特征的对应关系确定合适的参数;图像变换参照标准图像对采集图像进行几何变换,算法具体实现如下。

1) SIFT 特征提取

SIFT 算子由 Lowe 于 1999 年提出并于 2004 年进行完善^[16-17],是计算机视觉领域中描述和检测图像局部特征的重要算法。该算法获得的特征对于图像的尺度和旋转能保持不变,并且对亮度变化具有很强的鲁棒性,因此,本文也采用 SIFT 算子分别提取采集的图像与标准图像的特征。

2) 几何约束的特征匹配

特征匹配的质量直接影响图像配准的准确率,传统的 SIFT 特征匹配算法存在一个明显的缺点:它完全忽略特征之间的几何关系、只注重局部优化。实验中发现:该算法对于灰度变化比较平滑的图像在提取特征时效果并不是很好,在寻找匹配特征点对的过程中有时会产生很多误匹配的情况,鲁棒性不高,如图 3 所示。

SIFT 特征匹配算法的明显缺点在于它忽略了特征

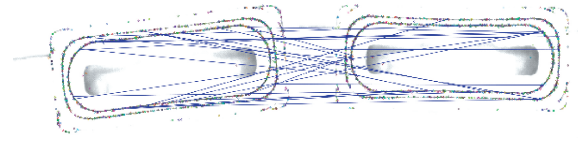


图 3 SIFT 特征匹配效果

Fig.3 The effect diagram of SIFT feature matching

周围的空间一致性,而几何信息作为一种重要的图像特征,应纳入图像配准中,以提高匹配准确率,故本文提出几何约束的特征匹配概念和算法,具体如下:

(1) 采用鲁棒性高的基于边界跟踪的图像拓扑结构分析算法^[18]提取图像的轮廓;

(2) 根据提取的图像外轮廓计算外轮廓的最小外接椭圆,图 4 所示为计算出的待配准图像与标准图像的最小外接椭圆效果图。

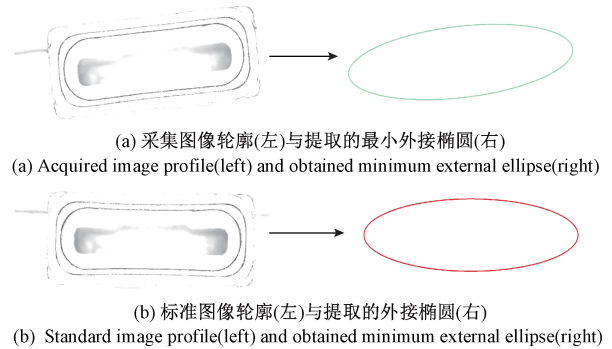


图 4 图像轮廓的最小外接椭圆

Fig.4 The minimum circumscribed ellipse of the image profile

(3) 根据外接椭圆的圆心和主轴水平夹角,获得待配准图像与标准图像位置几何信息。假设标准图像与待配准图像的外接椭圆的圆心坐标分别为 $O_1(x_1, y_1)$ 与 $O_2(x_2, y_2)$; 主轴水平夹角分别为 θ_1 与 θ_2 , 应用式(2)可估计出两幅图像间刚体变换矩阵 H 所需的 3 个参数:水平偏移量 t_x 、垂直偏移量 t_y 和旋转夹角 θ 。

$$\begin{cases} t_x = x_2 - x_1 \\ t_y = y_2 - y_1 \\ \theta = \theta_2 - \theta_1 \end{cases} \quad (2)$$

(4) 应用传统 SIFT 特征匹配算法得到与标准图像特征点集 $p \{ (x_{p1}, y_{p1}), (x_{p2}, y_{p2}), \dots, (x_{pn}, y_{pn}) \}$ 相匹配的待配准图像特征点集 $q \{ (x_{q1}, y_{q1}), (x_{q2}, y_{q2}), \dots, (x_{qn}, y_{qn}) \}$ 。对点集 q 中的点用式(3)进行几何变换,得到新的点集 $q' \{ (x_{q'1}, y_{q'1}), (x_{q'2}, y_{q'2}), \dots, (x_{q'n}, y_{q'n}) \}$ 。式(3)中的 H 为刚体几何变换矩阵。

$$\begin{bmatrix} x'_q \\ y'_q \\ 1 \end{bmatrix} = H \times \begin{bmatrix} x_q \\ y_q \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & t_x \\ \sin \theta & -\cos \theta & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_q \\ y_q \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

(5) 依次求出点集 q' 与点集 p 中对应特征点的欧氏距离 d , 若 d 小于某个阈值 t 时, 认为是正确的匹配, 保留匹配点对, 反之, 若 d 大于阈值 t , 则认为是误匹配点对, 从相应点集中剔除。选取阈值 $t=25$, 图 5 所示为对图 3 进行上述处理后得到的效果图, 可以看出特征点匹配准确率有显著提高。

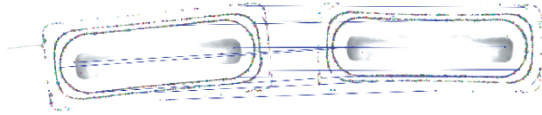


图 5 几何约束 SIFT 特征点匹配效果

Fig.5 The effect diagram of the geometric constrained SIFT feature point matching

3) 基于 RANSAC 算法的精准特征匹配

几何约束的 SIFT 特征匹配算法可获得较准确的匹配点对, 但由于该算法保留距离在一定阈值范围内的所有匹配点对, 这些匹配点对中存在的噪声点对对式 (3) 中的变换矩阵 H 的计算精度有较大影响, 为去除噪声点对的影响, 本文采用 RANSAC 算法实现更精准的参数估计^[18]。RANSAC 通过多次迭代, 有效去除匹配点对中的离群点对, 进而计算出精准几何变换矩阵 H , 算法具体如下:

(1) 选取参数 q 和 η , 设定迭代次数 $k=0$ 、初始总迭代次数 $N=2\ 000$ (OpenCV 默认);

(2) 进入迭代

(a) 随机抽取 2 个匹配点对;

(b) 由归一化直接线性变换计算变换矩阵 H ;

(c) 计算变换后的特征点坐标与所匹配的参考图像特征点坐标的距离 d , $d < \eta$ 即认为是内点对, 反之为外点对, 统计内点对的数量, 计算参数 ε , ε 为外点对数与全部点对数的比值;

(d) 由式 (4) 更新总迭代次数 N , 式 (4) 中: s 表示每一次抽取样本的数量, 这里 $s=2$ 。

$$N = \frac{\log(1-q)}{\log[1-(1-\varepsilon)^s]} \quad (4)$$

(e) $k++$, 若 $k < N$, 转步骤 2) 再次迭代, 否则转步骤 3)。

(3) 根据循环迭代后得到的内点对, 用广义最小二乘法求取刚体几何变换矩阵 H 。

图 6 所示为选取 $q=0.995$ 、阈值 $\eta=3$ 对图 5 应用 RANSAC 算法处理后的效果图。对比图 5、6, 可以看出, 采用 RANSAC 算法可有效剔除误匹配点, 得到更精确的匹配点对。

4) 图像变换

根据 3) 节得出的变换矩阵 H , 应用式 (5) 对处理后的采集图像进行变换, 完成图像配准处理。

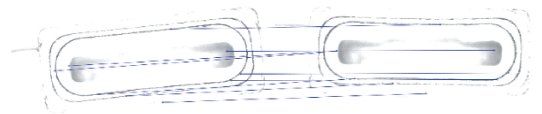


图 6 RANSAC 算法剔除误匹配点后效果

Fig.6 The effect diagram of removing mismatched points with RANSAC algorithm

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = H \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & t_x \\ \sin\theta & \cos\theta & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式 (5) 中 (x', y') 为变换后点的坐标, (x, y) 为原坐标。图 7 所示为对图 6 进行变换后的效果图, 可以看出达到了配准和归一化的目标。



图 7 图像变换后配准效果

Fig.7 The registration effect diagram after image transformation

1.3 图像边缘检测

获取图像的边缘是进一步提取直线的前提, 本文采用 Canny 算子进行图像边缘检测, 具体如下:

1) 采用最大化类间方差算法 (otsu), 多次迭代求出一个灰度值 t ;

2) 提取图像的前景点与背景点, 将 t 与 $0.5 \times t$ 分别作为高低阈值传入 Canny 算子中提取图像边缘。

1.4 直线检测改进算法

自动检测和提取图像中的直线一直是计算机视觉和图像分析领域的重要研究课题^[19-20], 目前典型的方法有标准 Hough 变换直线拟合算法和概率 Hough 变换直线拟合算法, 两种算法中的 Hough 空间投票值可能来源于真实共线的点, 也可能来源于非线性边缘上的点, 如果非线性边缘上的点中存在较多的共线点, 会在 Hough 空间形成伪峰, 伪峰值点将对周围的真峰值点产生抑制, 造成这两种算法对于不规则物体的直线检测精度较低。

由于手机尾插的圆弧矩形设计以及工业制造的原因, 手机尾插的棱有弧度, 采集的图像中, 一条棱是两条相距很近的有弧度的边缘线, 这些边缘线弯曲部分的像素点容易在 Hough 空间形成伪峰, 干扰直线检测。为此, 本文对 Hough 空间投票机制进行了改进, 设计新的 Hough 空间投票权重策略来抑制伪峰的产生, 提高直线检测的精准度。算法策略是给边缘上直线度大的像素点一个较大的投票权重, 而给弧度比较大的非线性边缘像素点一个较小的投票权重, 各像素点空间投票权重具体

由式(6)确定。

$$\begin{cases} dert = 1 + \lambda (C_i - \sqrt{(x - x_{o_i})^2 + (y - y_{o_i})^2})^2, \\ \quad \quad \quad x, y \in O_i(x_{o_i}, y_{o_i}) \\ dert = 1 \quad \quad \quad \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $dert$ 表示投票累加值; $O_i(x_{o_i}, y_{o_i})$ 为第*i*个以 (x_{o_i}, y_{o_i}) 为圆心; C_i 为半径的圆形区域; λ 用来控制投票累加值的最大值。

1.5 相机标定与计算测量

上述计算都是基于像素,要计算测量实际尺寸,需先获得相机在固定焦距下采集图像的单位像素间的实际物理尺寸,即对相机进行标定。由于测量系统的镜头选用的是物方远心镜头,相机畸变微小可以忽略不计,而且测量中焦距固定,因此,不需要对相机的内部参数进行标定,只需标定出相机水平和垂直的物理分辨率即可。考虑手机尾插的尺寸特点,本文基于测量标定法设计了如下标定相机水平和垂直物理分辨率的方法:

1) 采用宽度 5.5 mm、长度 4.5 mm、精度 1 μm 、格子数目为 20 \times 16 的棋盘格标定板作为标定参照物;

2) 测量系统采集棋盘格标定板的图像;

3) 提取采集图像中方格四角的点坐标,计算出图像中方格长宽 r'_x 与 r'_y (单位:pixel);

4) 应用式(7)计算出相机水平和垂直物理分辨率: X_{ppc} 和 Y_{ppc} 。

$$X_{ppc} = f/d_x = \frac{5.5}{r'_x}, \quad Y_{ppc} = f/d_y = \frac{4.5}{r'_y} \quad (7)$$

工件实际尺寸的计算测量可通过计算配准图像的测量点间像素点数与物理分辨率乘积获得,具体计算如式(8),式中: d_{ab} 是计算测量的图像点 a、b 间的实际物理尺寸, Δx_{ab} 、 Δy_{ab} 分别是点 a、b 间水平和垂直像素点数。

$$d_{ab} = \sqrt{(\Delta x_{ab} \times X_{ppc})^2 + (\Delta y_{ab} \times Y_{ppc})^2} \quad (8)$$

2 实验与分析

2.1 测量系统组成

测量系统硬件由工控机、1 296 \times 964 高分辨率 CCD 工业数码相机、远心镜头、红色环状 LED 光源、实验架等构成,如图 8 所示。工控机选用研华 ARK-2150F 无风扇嵌入式工业控制计算,其内部配置有 Intel i7 双核处理器、8 GB DDR3 内存、256 GB 固态硬盘、4 通道数字 I/O 接口、集成显卡等。系统另配有 21" LCD 显示器、触发开关。红色环状 LED 光源上方均匀照射待检测的手机尾插工件,以便减少外部光照的影响,获取低噪声的清晰图像。相机采集到的图像通过 USB 3.0 接口传输给工控机。

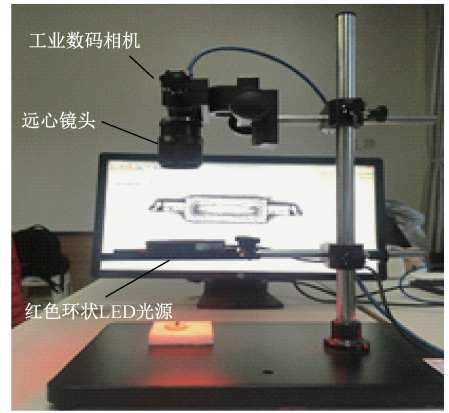


图 8 机器视觉测量系统硬件组成

Fig.8 The hardware composition of the machine vision measurement system

测量系统软件环境采用 WINDOWS 7 64 位旗舰版操作系统;测量应用软件用 C++语言开发,软件开发环境采用 Visual Studio 2012;支持库采用开源跨平台计算机视觉库 OpenCV2.4.8。

2.2 图像配准实验与分析

测量系统对同一型号的多个手机尾插工件共拍摄 300 张图像作为配准实验样本图像。采用式(9)所示的平均匹配精度 R 作为评判标准。

$$R = \frac{N_{right}}{N_{all}} \quad (9)$$

式中: N_{right} 表示正确的匹配点; N_{all} 表示全部匹配点数目。

分别用 SIFT 算法、SIFT+RANSAC 算法与 SIFT+几何特征+RANSAC 算法对样本图像进行处理,表 1 所示为 3 种算法匹配精度的实验统计汇总结果,可以得出:SIFT+几何特征+RANSAC 算法的图像匹配精度最高,较其他两种算法有较大的提升。

表 1 3 种算法图像匹配精度实验结果

Table 1 The image matching accuracy experiment results of the proposed algorithm and other two algorithms

自法	SIFT 算法	SIFT+RANSAC 算法	SIFT+几何特征+RANSAC 算法
R	0.76	0.87	0.98

2.3 直线检测实验与分析

选取一幅采集图像进行直线检测实验。图 9 所示为对图 4 中的 (a) 图像用 3 种直线检测算法提取直线的实验结果,本文提出的改进 HT 算法在确定投票权重时选取参数: $C_i = 280$ 、 $\lambda = 1/2800$ 。

图 9 中蓝色的线是由非线性边缘点在 Hough 空间形成伪峰点所提取的直线,可以看出,本文提出的改进 HT 检测算法能有效抑制伪峰的产生,具有较好的直线检测精度。

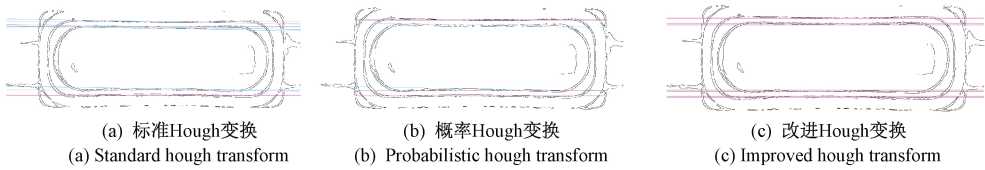


图9 3种直线提取算法效果

Fig.9 The effect diagram of three line extraction algorithms

为了观察改进算法对 Hough 空间伪峰的抑制效果,分别抽取用标准 HT 算法和改进算法检测到的前 10 000 个点,用 MATLAB 分别绘制抽取点在 Hough 空间的分布情况,结果如图 10 所示。可以看出,标准 HT 算法得到的检测点在 Hough 空间中的分布相对嘈杂,伪峰点与真峰点包

围在一起,形成了一个近似锥形,说明真峰旁边充斥着无数伪峰值点,真峰不能显著突出;改进算法得到的检测点在 Hough 空间中的分布峰值明显尖锐,说明峰值点被包围在一起的情况较少,真峰锐利突出,改进算法很好的抑制了 Hough 空间中伪峰的高度,进而提高了直线检测的精度。

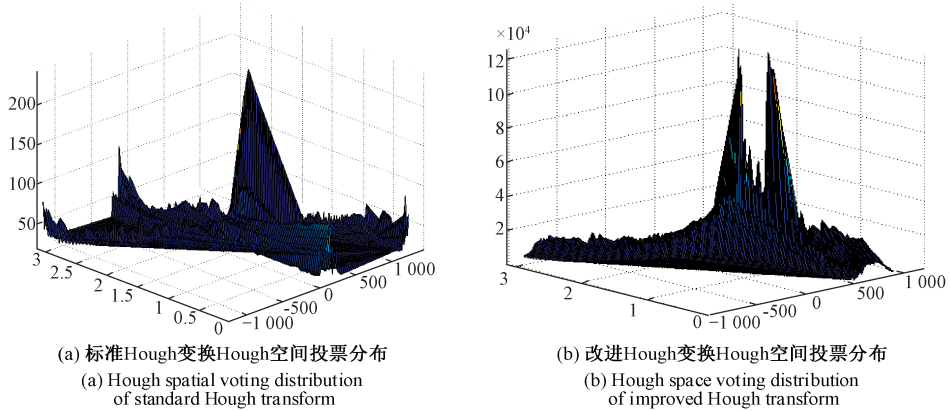


图10 两种直线提取算法的 Hough 空间投票分布

Fig.10 The Hough space voting distribution diagram of two line extraction algorithms

对于 300 张采集的样本图像分别进行标准 HT、概率 HT 以及本文提出的改进 HT 算法进行直线检测实验,采用式(10)的平均直线检测精度 P 作为评判标准。

$$P = L_{\text{right}} / L_{\text{all}} \quad (10)$$

式中: L_{all} 为遍历峰值点检测到直线数; L_{right} 为最终需要检测到的直线数,对于手机尾插工件来说为 8 条。

表 2 所示为 3 种算法检测精度的实验统计结果,可以得出,本文提出的改进 HT 算法检测精度最高,较其他两种算法有较大幅度的提升。

表 2 3种算法检测精度实验结果

Table 2 The detection accuracy experiment results of the proposed algorithm and other two algorithms

算法	P
标准 HT 算法	0.67
概率 HT 算法	0.53
改进 HT 算法	0.89

2.4 精密测量实验与分析

随机选一个 D_{ad} 、 D_{bc} 标准长度为 3.02 mm、2.52 mm 的手机尾插良品工件作为实验样本(良品的长度误差小于 ± 0.1 mm)。人工用精密测量仪器(精度为 0.005 mm)测得该样品 D_{ad} 、 D_{bc} 的长度为 2.990 mm、2.510 mm。用设计的测量系统对该样本共进行 300 次测量实验,每次实验改变工件的摆放位置、角度或移动工件托垫,表 3 所示为测量实验的统计结果。

表 3 手机尾插件的系统测量实验结果

Table 3 The experiment measurement results of mobile phone tail plug part with the proposed system

结果	D_{ad}	D_{bc}
长度均值/mm	2.975	2.528
最大误差/mm	± 0.0137	± 0.0092
标准差/mm	0.0038	0.0019

实验结果表明:测量系统对手机尾插棱外距的测量最大误差为 ± 0.0137 mm,误差标准差为 0.0038,对棱内

距的测量最大误差为 $\pm 0.009\ 2$ mm, 误差标准差为 $0.001\ 9$, 系统具有较小的计算测量误差和良好的测量鲁棒性。

选取上述型号的 5 个手机尾插工件作为样本进行系统测量精度验证实验, 测量系统对每个工件测量 10 次, 统计测量值的平均值并与用精密测量仪器的测量值进行比较, 表 4 所示为实验统计结果。实验结果表明, 本系统的平均测量精度达到 $0.015\ 8$ mm。

表 4 系统测量精度验证实验结果

Table 4 The verification experiment results of the measurement precision of the proposed system

序号	D_{ad}/mm		D_{bc}/mm		平均误差
	系统测量	仪器测量	系统测量	仪器测量	
1	2.975	2.990	2.528	2.510	0.016 5
2	3.089	3.090	2.629	2.600	0.015 0
3	2.984	3.000	2.500	2.515	0.015 5
4	3.079	3.065	2.558	2.575	0.015 5
5	2.987	3.005	2.569	2.575	0.016 5
平均			0.015 8		

3 结 论

本文以手机尾插工件尺寸检测为背景, 提出了一种基于机器视觉的小尺寸不规则零件精密测量方法并研制了精密尺寸测量系统。该方法对传统方法进行了如下改进: 1) 引入轮廓匹配获取图像几何信息、对 SIFT 特征点匹配进行约束, 并通过 RANSAC 算法去除噪声点对的影响、精准估计几何变换矩阵, 提高了特征点匹配准确率; 2) 设计了 Hough 空间投票权重分配新策略来抑制伪峰产生, 提高了图像边缘直线检测精准度。测量系统硬件由高分辨率 CCD 工业相机、远心镜头、红色环状 LED 光源、实验架、高性能嵌入式工控机构成。实验结果表明, 本文方法特征匹配精度提高了 12%, 直线检测精准度提高了 22%; 研制系统的测量精度达到 $0.015\ 8$ mm, 可以满足手机生产自动化检测的要求并应用于某型号手机生产线检测设备中。另外, 本文研究还在工业测量、智能检验等领域有广泛的应用前景。

参考文献

[1] 冯轶. 基于机器视觉的金属手机外壳尺寸测量与表面典型缺陷检测研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
FENG K. Research on dimension measurement and typical surface defect detection of metal mobile phone shell based on machine vision [D]. Guangzhou: South

China University of Technology, 2018.

- [2] 李渊. 基于机器视觉的智能手环壳体几何尺寸测量系统研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2017.
LI Y. Research on measurement system of smart watch shell's geometric size based on machine vision [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2017.
- [3] 代娜. 基于机器视觉的小型规则零件二维尺寸测量研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2008.
DAI N. Research on 2-D measurement for small rule mechanical parts based on machine vision [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2008.
- [4] 刘国阳. 基于机器视觉的微小零件尺寸测量技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
LIU G Y. The Research of dimension of micro parts based on machine vision [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [5] 支珊, 赵文珍, 赵文辉, 等. 基于齿轮局部图像的齿距机器视觉测量方法 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(1): 225-231.
ZHI SH, ZHAO W ZH, ZHAO W H, et al. Visual measurement of pitch machine based on gear local image [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(1): 225-231.
- [6] BÖHM J, JECH M, VELLEKOOP M. Analysis of NM-scale scratches on high-gloss tribological surfaces by using an angle-resolved light scattering method [J]. Tribology Letters, 2009, 37(2): 209-214.
- [7] 苑玮琦, 薛丹. 基于机器视觉的隧道衬砌裂缝检测算法综述 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(12): 3100-3111.
YUAN W Q, XUE D. Review of tunnel lining crack detection algorithm based on machine vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(12): 3100-3111.
- [8] 刘超. 基于机器视觉的微型零件自动测量与装配 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
LIU CH. Automatic measurement and assembly for miniature parts based on machine vision [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [9] 朱霞. 不规则零件机器视觉检测中的关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
ZHU X. Research on some key technologies for detection of irregular parts based on machine vision [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.

- [10] LEE I H, MAHMOOD M T. Adaptive outlier elimination in image registration using genetic programming [J]. *Information Sciences*, 2017, 42(1): 204-217.
- [11] ZHENG J, TIAN J, DENG K, et al. Salient feature region: A new method for retinal image registration [J]. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2011, 15(2): 221-232.
- [12] KACHENOURA N, CLUZEL P, FROUIN F, et al. Evaluation of an edge-based registration method: application to magnetic resonance first-pass myocardial perfusion data [J]. *Magnetic Resonance Imaging*, 2011, 29(6): 853-860.
- [13] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [14] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features [C]. *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, 1999(2): 1150-1157.
- [15] SUZUKI S. Topological structural analysis of digitized binary images by border following [J]. *Computer Vision Graphics and Image Processing*, 1985, 30(1): 32-46.
- [16] MATAS J, CHUM O. Randomized RANSAC with sequential probability ratio test [C]. *Proceedings of the Tenth IEEE International Conference on Computer Vision*, 2005(1): 1727-1732.
- [17] GUO S Y, PRIDMORE T. An improved Hough transform voting scheme utilizing surround suppression [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2009, 30(13): 1241-1252.
- [18] MUKHOPADHYAY P, CHAUDHURI B B. A survey of Hough Transform [J]. *Pattern Recognition*, 2015, 48(3): 993-1010.

作者简介



张喜民(通信作者),分别在1995年和2001年于空军工程大学获得学士与硕士学位,2006年于西安电子科技大学获得博士学位,现为陕西国际商贸学院教授,主要研究方向为计算机测控系统、嵌入式系统。

E-mail: zczya@suhu.com

Zhang Ximin (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. both from Air Force Engineering University in 1995 and in 2001, respectively, and his Ph. D. degree from Xidian University in 2006. Now, he is a professor in Shanxi Institute of International Trade & Commerce. His main research interests include computer measurement and control system, embedded system.



余奇颖,2016年于吉林大学获得学士学位,2019年于西安电子科技大学获得硕士学位,现为北京地平线机器人技术研发有限公司工程师,她的主要研究方向为机器视觉。

E-mail: 295052334@qq.com

Yu Qiyang received her B. Sc. degree from Jilin University in 2016 and M. Sc. degree from Xidian University in 2019. Now, she is an engineer in Horizon Robotics, Inc. Her main research interest is machine vision.



张金博,1995年于陕西理工大学获得学士学位,现为陕西国际商贸学院高级工程师,主要研究方向为物联网、工业自动化及智能控制。

E-mail: 295052334@qq.com

Zhang Jinbo received his B. Sc. degree from Shaanxi Institute of Technology in 1995. Now, he is a senior engineer in Shaanxi Institute of International Trade & Commerce. His main research interests include Internet of Things, industrial automation and intelligent control.